

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ХАРЬКОВСЬКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ДЛЯ КУРСОВОГО И ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

«РАСЧЕТ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ»

для студентов специальности 144 «Теплоэнергетика»
всех форм обучения

Харьков 2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ХАРЬКОВСЬКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ДЛЯ КУРСОВОГО И ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

«РАСЧЕТ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ»

для студентов специальности 144 «Теплоэнергетика»
всех форм обучения

Утверждено
ученым советом энерго-
машиностроительного факультета
протокол № 1 от 26.09.17

Харьков
НТУ «ХПИ»

2017

Методические указания для курсового и дипломного проектирования
«Расчет методической печи» для студентов специальности 144
«Теплоэнергетика» всех форм обучения/ Сост. Н.А. Тарасенко, А.Н. Тарасенко –
Харьков: НТУ «ХПИ», 2017. – 48 с.

Составитель: Н. А. Тарасенко
А. Н. Тарасенко

Рецензент С. В. Угольников

Кафедра теплотехники и энергоэффективных технологий

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Исходные данные для расчета	6
2. Расчет горения топлива	7
3. Расчет теплообмена в рабочем пространстве печи	9
4. Расчет нагрева металла	12
5. Определение основных размеров печи	19
6. Тепловой баланс печи и определение расхода топлива	20
7. Расчет рекуператора воздухоподогревателя	26
Приложения	32
Список литературы	47

ВВЕДЕНИЕ

Конечную продукцию прокатного производства – рельсы, трубы, различные профили получают путем многократного обжата заготовок. Заготовки перед прокаткой должны быть нагреты, в зависимости от сорта прокатываемого материала, до $1100\div 1250$ °С. Нагревают заготовки в нагревательных печах, которые располагаются в непосредственной близости от прокатных станов. Конструкции таких нагревательных печей весьма разнообразны. Топливом для них могут служить: доменный, коксовый, природный газы или мазут. Среди печей непрерывного действия наибольшее распространение получили методические нагревательные печи на газообразном или жидком топливе. В методических нагревательных печах осуществляется противоточная схема движения материалов и продуктов сгорания.

Основным признаком классификации методических печей является число зон. При этом различают зоны сжигания топлива и температурные зоны печи.

Под зонами сжигания топлива понимают части рабочего пространства, снабженные топливосжигающими устройствами и отделенные друг от друга нагреваемым металлом и пережимами свода или пода.

Под температурными зонами понимают части рабочего пространства с существенно выраженными отличиями рабочего режима. Число зон сжигаемого топлива характеризует конструктивные особенности печи, профиль ее рабочего пространства, размер камер и т.д.

Число температурных зон печи характеризует режим ее работы. Различают трехзонный и двухзонный температурные режимы печи.

При трехзонном режиме (рис. 1) по длине рабочего пространства печи различают три характерные температурные зоны: томильную, сварочную и методическую. В сварочной зоне наиболее высокая температура газов, мало меняющаяся по длине (сжигается топливо). В методической зоне по длине происходит существенное снижение температуры газов (сжигание топлива не предусмотрено). Томильная зона служит для выравнивания температуры по сечению материала.

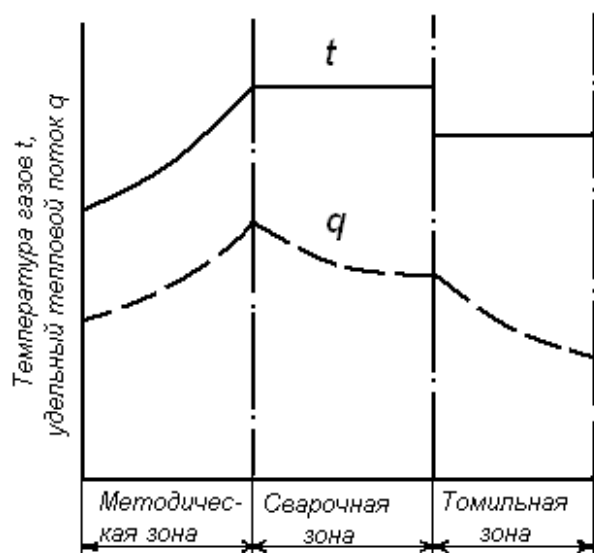


Рисунок 1 – Диаграмма трехзонного температурного и теплового режимов методических печей

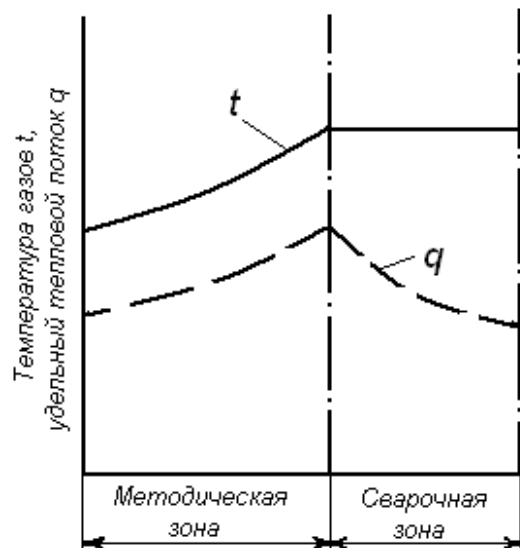


Рисунок 2 – Диаграмма двухзонного температурного и теплового режимов методических печей

При двухзонном режиме (рис. 2) рабочее пространство печи по длине можно разделить на две характерные зоны: сварочную и методическую. Двухзонный температурный режим может быть осуществлен при любом числе зон сжигания топлива.

Методическая печь как тепловой агрегат отличается сложностью протекающих в ее рабочем пространстве процессов движения газов, внешнего и внутреннего теплообмена. В процессе расчета внешнего теплообмена значительные трудности возникают в учете влияния водоохлаждаемых подовых труб на величину коэффициента теплоотдачи от газов и кладки к нижней поверхности металла. Для инженерных расчетов принимают приведенные коэффициенты излучения для верхних и нижних зон одинаковыми. При расчете внешнего теплообмена расчет ведется по средней расчетной температуре газов в каждой зоне.

Расчеты производятся отдельно для каждой температурной зоны печи, причем для печей, работающих по двухзонному температурному режиму, расчет сварочной зоны ведется отдельно для участков с двухсторонним и односторонним нагревом.

Продолжительность нагрева металла по зонам определяется по приращению теплосодержания металла и среднему тепловому потоку на металл в зонах.

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

1.1. Режим работы печи – двухзонный температурный. Печь имеет зону методического нагрева и сварочную зону с двухсторонним нагревом и монокристаллическим подом.

1.2. Производительность печи – G т/ч.

1.3. Нагреваемый материал – заготовки квадратного или круглого сечения заданной длины l из стали заданного состава.

1.4. Параметры нагрева металла:

- начальная температура t_n , °C;
- конечная температура поверхности материала $t_{п.к}$, °C;
- конечный перепад температур по сечению Δt_k , °C.

1.6. Температура подогрева воздуха t_b , °C.

1.5. Топливо – смесь природного и доменного газов с теплотой сгорания Q_H^p , МДж/м³. Состав газов указывается в виде таблицы 1.1.

Таблица 1.1 – Данные по составу газа

Наименование газа	Состав газа										
	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	H ₂	N ₂	O ₂	H ₂ O
Природный	-	0,1	92,8	3,9	1	0,4	0,3	-	1,5	-	-
Доменный	27	12,5	0,3	-	-	-	-	5	55,0	0,2	4,17

2. РАСЧЕТ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

2.1. Теплота сгорания газов, кДж/м³:

$$Q_H^p = 127,7CO + 108H_2 + 358CH_4 + 590C_2H_4 + 555C_2H_2 + \\ + 638C_2H_6 + 913C_3H_8 + 1185C_4H_{10} + 1465C_5H_{12} + 234H_2S$$

2.2. Состав смешанного газа. Доля доменного газа – x находится из уравнения баланса

$$Q_{H(д.г)}^p x + Q_{H(п.г)}^p (1 - x) = Q_{H(см)}^p ,$$

$$x = \frac{Q_{H(п.г)}^p - Q_{H(см)}^p}{Q_{H(п.г)}^p - Q_{H(д.г)}^p} .$$

Доля природного газа: $1 - x$.

Состав смешанного газа:

$$CO_{см} = CO_{п.г}(1 - x) + CO_{д.г} \cdot x$$

$$CO_{2\ см} = CO_{2\ п.г}(1 - x) + CO_{2\ д.г} \cdot x$$

Остальные величины определяются аналогичным образом. Результаты расчета сводятся в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты расчета

Состав смешанного газа, %									
CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	H ₂	N ₂	O ₂	H ₂ O

2.3. Определяем плотность смешанного газа, кг/м³:

$$\rho_{см} = \frac{28CO + 44CO_2 + 16CH_4 + 30C_2H_6 + 44C_3H_8 + 58C_4H_{10}}{22,4 \cdot 100} + \frac{2H_2 + 28N_2 + 32O_2 + 18H_2O}{22,4 \cdot 100} .$$

2.4. Теоретически необходимое количество воздуха для сжигания газа, м³/м³:

$$V^o = 0,0476 (0,5CO + 0,5H_2 + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2)$$

2.5. Действительное количество воздуха для сжигания газа (рекомендуется принять коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,1$), $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$V_{\text{в}} = \alpha V^{\circ}.$$

2.6. Количество и состав продуктов сгорания (на 1 м^3 смешанного газа), $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$V_{\text{CO}_2} = (\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{CH}_4 + 2\text{C}_2\text{H}_6 + 3\text{C}_3\text{H}_8 + 4\text{C}_4\text{H}_{10}) \cdot \frac{1}{100};$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = (\text{H}_2 + 2\text{CH}_4 + 3\text{C}_2\text{H}_6 + 4\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{C}_4\text{H}_{10} + \text{H}_2\text{O}) \cdot \frac{1}{100};$$

$$V_{\text{N}_2} = (\text{N}_2 + 79 V_{\text{в}}) \cdot \frac{1}{100};$$

$$V_{\text{O}_2} = 21(\alpha - 1) V^{\circ} \cdot \frac{1}{100}.$$

Общее количество продуктов сгорания на 1 м^3 смешанного газа, $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$V_{\text{п.с}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2}.$$

2.7. Парциальные давления продуктов сгорания в долях:

$$P_{\text{CO}_2} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{п.с}}}; \quad P_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{п.с}}};$$

$$P_{\text{N}_2} = \frac{V_{\text{N}_2}}{V_{\text{п.с}}}; \quad P_{\text{O}_2} = \frac{V_{\text{O}_2}}{V_{\text{п.с}}}.$$

2.8. Плотность продуктов сгорания

$$\rho_{\text{п.с}} = \frac{44\text{CO}_2 + 18\text{H}_2\text{O} + 32\text{O}_2 + 28\text{N}_2}{22,4 \cdot 100}.$$

3. РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕНА В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ ПЕЧИ

3.1. Для расчета теплообмена нужно знать размеры рабочего пространства печи. Они выбираются из конструктивных соображений с учетом опыта работы нагревательных печей. Ширина рабочего пространства при двухрядном расположении заготовок

$$A = 2 l + 3 \delta,$$

где l – длина заготовки, м; δ – ширина зазора между заготовками и между боковыми стенками печи (принимается равной 0,25 м).

В пределах длины каждой зоны высота рабочего пространства переменна. При переходе к следующей по движению газов зоне предусматривают понижение (пережим) свода для приближения газового потока к нагреваемым заготовкам. Пережим на границе между зонами способствует более полному сгоранию топлива в зоне в результате повышения температуры и лучшего перемешивания газовой среды в этой зоне.

Рекомендуется следующее соотношение высоты в пережиме к средней высоте зон со стороны движения газов: $0,5 \div 0,7$ в промежутке между зонами III и II; $0,25 \div 0,35$ – между зонами I и II. При наличии двух участков сварочной зоны пережим на границе этих участков делается на высоте, отсчитанной от заготовок, которая составляет $0,4 \div 0,5$ средней высоты участка, из которого поступают газы.

Высота рабочего пространства из опыта эксплуатации принимается:

- в сварочной зоне – $H_{\text{св}} = 2 \div 2,5$ м;
- в методической зоне – $H_{\text{мет}} = 1 \div 1,2$ м.

3.2. Средняя эффективная длина луча, м:

$$l_{\text{эф}} = 3,6 \frac{V}{\sum F} = 3,6 \frac{F_{\text{п}}}{S},$$

где V – объем рабочего пространства печи (зоны), м^3 ; $\sum F$ – сумма площадей поверхностей, ограничивающих рабочее пространство, м^2 ; $F_{\text{п}}$ – площадь поперечного сечения рабочего пространства, м^2 ; S – периметр площади

поперечного сечения рабочего пространства, м.

Для сварочной зоны:

$$F_{\text{св}} = A H_{\text{св}}, \quad S_{\text{св}} = 2(A + H_{\text{св}}).$$

$$l_{\text{эф.св}} = 3,6 \frac{F_{\text{св}}}{S_{\text{св}}}.$$

Для зоны методического нагрева:

$$F_{\text{мет}} = A H_{\text{мет}}; \quad S_{\text{мет}} = 2(A + H_{\text{мет}}).$$

$$l_{\text{эф.мет}} = 3,6 \frac{F_{\text{мет}}}{S_{\text{мет}}}.$$

3.3. Произведение парциальных давлений излучающих газов на среднюю эффективную длину луча:

в сварочной зоне – $P_{\text{CO}_2} \cdot l_{\text{эф.св}}$, $P_{\text{H}_2\text{O}} \cdot l_{\text{эф.св}}$;

в зоне методического нагрева – $P_{\text{CO}_2} \cdot l_{\text{эф.мет}}$, $P_{\text{H}_2\text{O}} \cdot l_{\text{эф.мет}}$.

3.4. Степень черноты газов в сварочной и методической зонах определяется по графикам степени черноты этих газов (рис. 3.1).

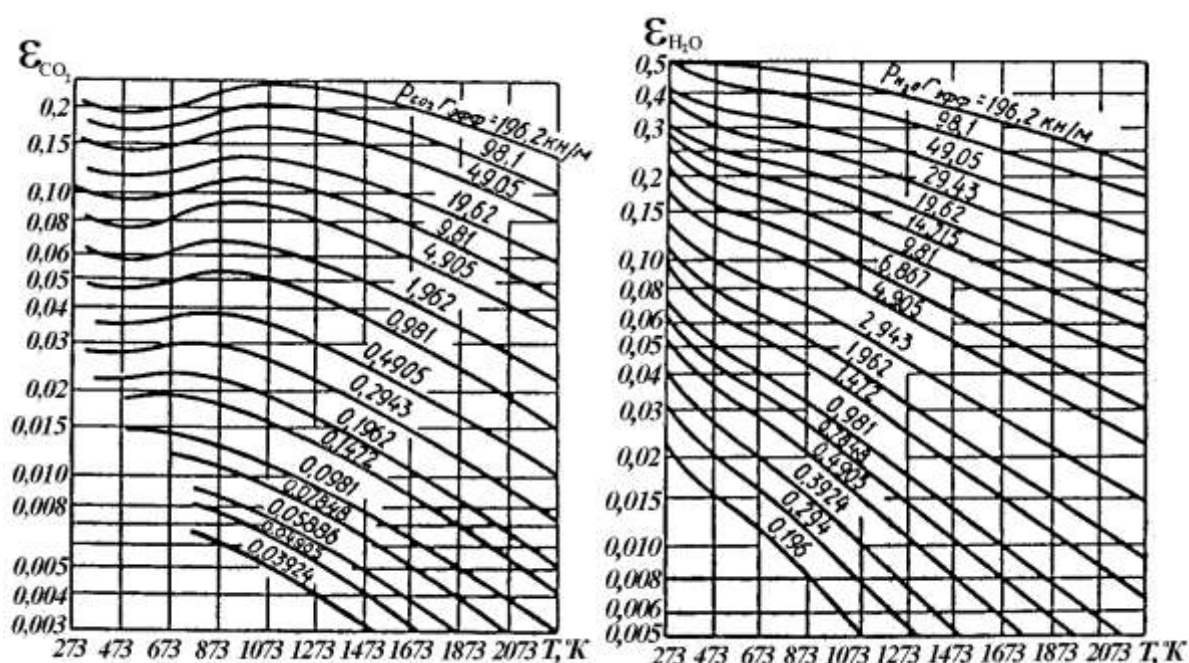


Рисунок 3.1 – Графики изменения степени черноты углекислого газа и водяного пара

Для пользования графиками нужно задаться температурным режимом печи и определить средние температуры сварочной и методической зон.

Температуру газов в сварочной зоне принимаем на $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше максимальной температуры поверхности металла в конце нагрева, $^{\circ}\text{C}$:

$$t_{\text{св}} = t_{\text{п.к}} + 50.$$

Температуру газов по длине зоны принимаем постоянной.

Температуру уходящих газов t_{yx} принимаем в пределах $950\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тогда средняя температура газов в методической зоне, $^{\circ}\text{C}$:

$$t_{\text{мет.ср}} = \frac{t_{\text{св}} + t_{\text{yx}}}{2}.$$

Степени черноты газов в сварочной и методической зонах определяются по графикам (см. рис. 3.1):

$$\varepsilon_{\text{п.г}} = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \zeta \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}},$$

где ζ – поправочный множитель (определяется по рис. 3.2).

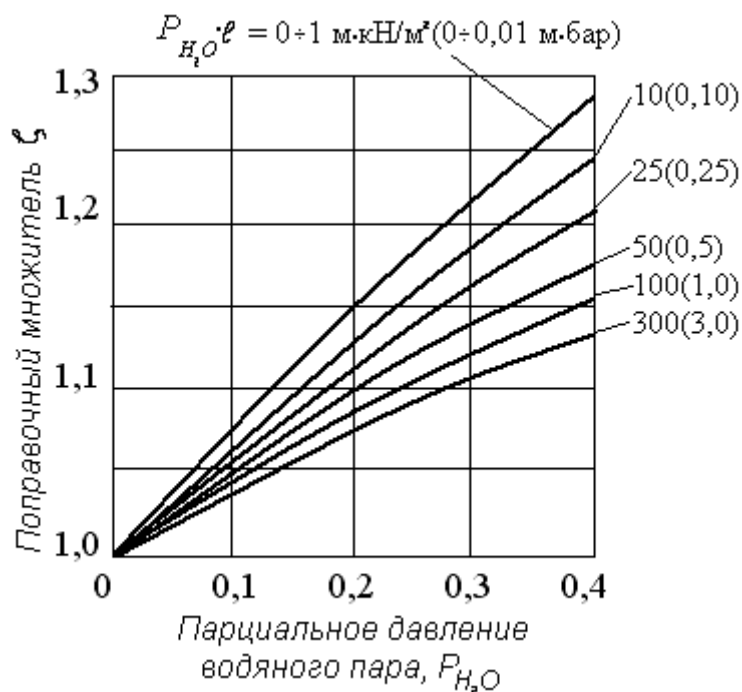


Рисунок 3.2 – Поправочный коэффициент к степени черноты H_2O

3.5. Степень развития кладки:

в сварочной зоне

$$\omega_{\text{св}} = \frac{1}{\varphi_{21}} = \frac{S_{\text{св}}}{A} = \frac{2(H_{\text{св}} + A)}{A};$$

в методической зоне

$$\omega_{\text{мет}} = \frac{1}{\varphi_{21}} = \frac{S_{\text{мет}}}{A} = \frac{2(H_{\text{мет}} + A)}{A}.$$

3.6. Приведенный коэффициент излучения определяется по формуле Тимофеева, Вт/(м²·°K⁴):

в сварочной зоне

$$\sigma_{\text{св}} = 5,67 \cdot \varepsilon_{\text{м}} \varepsilon_{\text{п.г}} \frac{\varphi_{21}(1 - \varepsilon_{\text{п.г}}) + 1}{\varphi_{21}(1 - \varepsilon_{\text{п.г}})[\varepsilon_{\text{м}} + \varepsilon_{\text{п.г}}(1 - \varepsilon_{\text{м}})] + \varepsilon_{\text{п.г}}};$$

в методической зоне

$$\sigma_{\text{мет}} = 5,67 \cdot \varepsilon_{\text{м}} \varepsilon_{\text{п.г}} \frac{\varphi_{21}(1 - \varepsilon_{\text{п.г}}) + 1}{\varphi_{21}(1 - \varepsilon_{\text{п.г}})[\varepsilon_{\text{м}} + \varepsilon_{\text{п.г}}(1 - \varepsilon_{\text{м}})] + \varepsilon_{\text{п.г}}}.$$

Для окисленной поверхности железа степень черноты $\varepsilon_{\text{м}} = 0,8$.

4. РАСЧЕТ НАГРЕВА МЕТАЛЛА

Расчет нагрева металла может быть выполнен в двух вариантах (в зависимости от постановки задачи):

1) определение времени нагрева металла и размеров печи по принятым параметрам температурного режима печи;

2) определение основных параметров температурного режима печи по принятой длине и напряженности ее активного пода.

Данный метод расчета выполнен по первому варианту, в котором принимается температура уходящих газов – t_{yx} , °C.

Последовательность расчета

4.1. Определение средней температуры и теплосодержания металла в конце нагрева, °С:

$$\bar{t}_k = t_{п.к} - \frac{2}{3} \Delta t_k,$$

где Δt_k – конечный перепад температур по сечению в соответствии с заданием.

Теплосодержание стали I_k берут из справочных данных (см. приложение 4) или рассчитывают, кДж/кг:

$$I_k = C_p \cdot \bar{t}_k.$$

4.2. Удельный тепловой поток к поверхности металла в конце нагрева приближенно можно подсчитать по формуле

$$q_k = \frac{\lambda \Delta t_k}{S},$$

где λ – коэффициент теплопроводности металла при средней температуре в конце нагрева, Вт/м·К; S – полутолщина нагреваемой заготовки, м.

Здесь и далее в случае нагрева круглых заготовок вместо S используется r – радиус заготовки.

4.3. Расчетная температура в сварочной зоне (температура, которая обеспечивает величину потока – q_k), °С:

$$t_{св} = 100 \sqrt[4]{\frac{q_k}{\sigma_{св}} + \left(\frac{T_{п.к}}{100} \right)^4} - 273.$$

4.4. Физическое тепло, внесенное нагретым до температуры t_b воздухом, МДж/м³:

$$Q_{\phi} = V_b I_b.$$

4.5. Тепло, уходящее из сварочной зоны вместе с газами, кДж/м³:

$$Q_{св}^{yx} = V_{п.г} I_{св},$$

где $V_{п.г}$ – объем продуктов горения на 1 м^3 смешанного газа, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $I_{св}$ – теплосодержание газов, уходящих из сварочной зоны при температуре $t_{св}$, $\text{кДж}/\text{м}^3$ (см. приложение 5).

4.6. Количество тепла, излучаемое из сварочной зоны в методическую, МВт:

$$Q_{изл}^{св} = q_{изл}^{св} F ,$$

где $q_{изл}^{св}$ – удельный тепловой поток излучения из сварочной зоны в методическую, $\text{кВт}/\text{м}^2$, принимается в пределах $130 \div 140 \text{ кВт}$; F – площадь поперечного сечения на границе сварочной и методической зон, м^2 . Вычисляется по формуле

$$F = A \cdot 2H .$$

4.7. Общая тепловая мощность печи, МВт:

$$M_{общ} = G q_{уд} ,$$

где G – часовая производительность печи, $\text{кг}/\text{ч}$; $q_{уд}$ – удельный расход тепла (рекомендуется предварительно принять эту величину равной $2,3 \text{ МДж}/\text{кг}$). В конце расчета нужно произвести проверку правильности принятия данной величины.

4.8. Тепло уходящих газов, $\text{МДж}/\text{м}^3$:

$$q_{ух} = V_{п.г} I_{ух} .$$

4.9. Доля использованного тепла:

в сварочной зоне

$$\eta_{св} = \frac{Q_{н}^p + Q_{ф} - Q_{ух}^{св}}{Q_{н}^p} - \frac{Q_{изл}^{св}}{M_{общ}} ;$$

в печи

$$\eta_{общ} = \frac{Q_{н}^p + Q_{ф} - Q_{ух}}{Q_{н}^p} .$$

4.10. Общее приращение теплосодержания металла, кДж/кг:

$$\Delta I = I_{\text{к}} - I_0,$$

где $I_{\text{к}}$ – теплосодержание стали (см. п. 4.1.); I_0 – теплосодержание металла при заданной начальной температуре $t_{\text{н}}$ (см. приложение 4).

Приращение теплосодержания металла в методической зоне, кДж/кг:

$$\Delta I_1 = \Delta I \left(1 - \frac{\eta_{\text{св}}}{\eta_{\text{общ}}} \right).$$

4.11. Расчет нагрева металла в методической зоне:

удельный тепловой поток в начале зоны, кВт/м²

$$q_0 = \sigma_{\text{мет}} \left[\left(\frac{T_{\text{yx}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{нач}}}{100} \right)^4 \right];$$

удельный тепловой поток в конце зоны, кВт/м²

$$q_1 = \sigma_{\text{мет}} \left[\left(\frac{T_{\text{св}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{к.м}}}{100} \right)^4 \right],$$

где $T_{\text{к.м}}$ – температура поверхности металла в конце методического нагрева.

Величину $T_{\text{к.м}}$ можно представить следующим образом:

$$T_{\text{к.м}} = t_{\text{к.м}} + 273 = \bar{t} + \frac{q_1 S}{3\lambda} + 273,$$

где \bar{t} – средняя по сечению температура металла (определяется по теплосодержанию в конце методической зоны), °С; q_1 – определяется методом последовательных приближений (в первом приближении принять $q_1 = 120$ кВт/м²); λ – коэффициент теплопроводности металла при \bar{t} , Вт/м·К (см. приложения 3,10,12).

Температура поверхности металла в конце зоны, °С:

$$t_{\text{пов1}} = \bar{t} + \frac{q_1 S}{3\lambda}.$$

Перепад температур по сечению металла в конце зоны, °С:

$$\Delta t_1 = \frac{q_1 S}{2\lambda}.$$

Температура на оси металла в конце зоны, °С:

$$t_{\text{с1}} = t_{\text{пов1}} - \Delta t_1.$$

Средний тепловой поток в методической зоне, кВт/м²:

$$\bar{q} = \sqrt{q_0 q_1}.$$

Время нагрева металла в методической зоне, с:

$$\tau_1 = \frac{\Delta I_1 S \rho}{\bar{q}},$$

где S – половина толщины или радиус заготовки, м; ρ – плотность металла, кг/м³.

4.12. Расчет нагрева металла на участке сварочной зоны с монолитным подом. Время нагрева металла на этом участке, ч:

$$\tau_3 = \frac{L''_{\text{св}} 2S l \rho n}{G},$$

где $L''_{\text{св}}$ – длина монолитного пода; n – количество рядов загрузки. Принять $n = 2$.

При движении заготовок по водоохлаждаемым трубам в зоне контакта происходит местное захлаживание заготовок. Такая неравномерность нагрева отрицательно сказывается на качестве проката. Чтобы выровнять температуру по сечению заготовки в печи предусмотрен участок с монолитным подом

$L_{м.п} = 4\text{--}5$ м, что считается вполне достаточным для устранения недогрева заготовок. Нагрев заготовок на участке с монолитным подом односторонний.

Определяем критерий Фурье: $Fo = \frac{a \tau_3}{S^2}$. Физические константы принимаем по температуре $t_{ср.к}$ (см. приложения 3, 4, 10, 11, 12). Здесь: λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К; c – удельная теплоемкость металла, кДж/кг·К:

$$c = \frac{I_k}{\bar{t}_k};$$

a – коэффициент температуропроводности, м/с: $a = \frac{\lambda}{c \rho}$.

Теплофизические свойства стали выбираем по \bar{t}_k .

Определяем критерий Био:

$$Bi = \frac{\alpha S}{\lambda},$$

где α – коэффициент теплоотдачи в конце нагрева, Вт/м²·К:

$$\alpha = \frac{q_k}{t_{св} - t_{п.к}}$$

По графику (рис. 4.1) находим критерий Φ .

Температуру поверхности металла при переходе на монолитный под $t_{п2}$, находим из критерия Φ :

$$\Phi = \frac{t_{св} - t_{п.к}}{t_{св} - t_{п2}},$$

$$t_{п2} = t_{св} - \frac{t_{св} - t_{п.к}}{\Phi}.$$

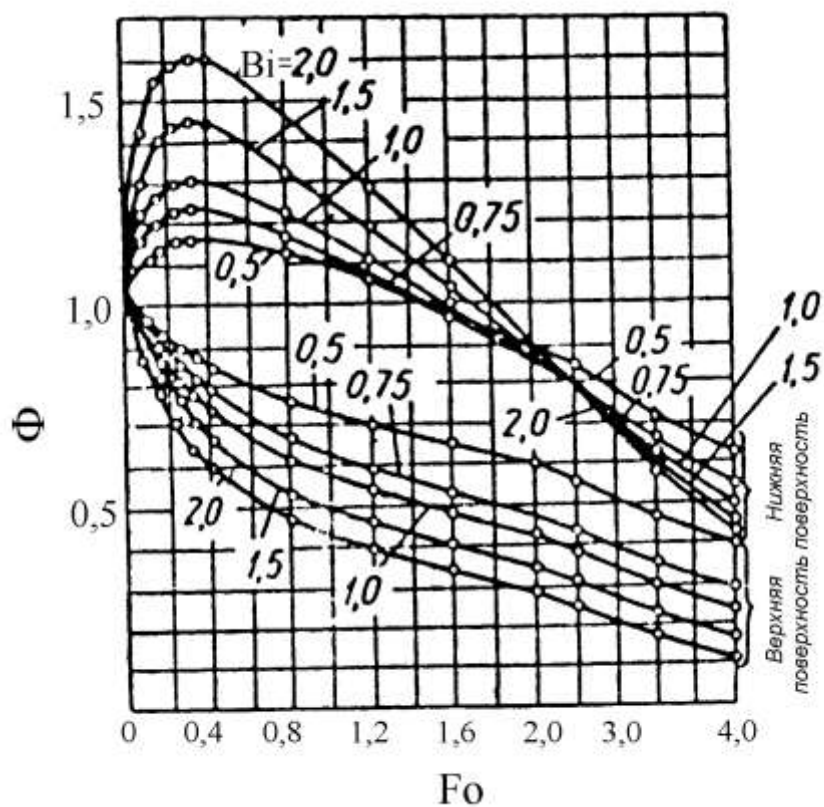


Рисунок 4.1 – График для расчета нагрева металла на монокристаллическом поду сварочной зоны двухзонных методических печей

Удельный тепловой поток в начале участка монокристаллического пода, кВт/м²:

$$q_2 = \sigma_{\text{св}} \left[\left(\frac{T_{\text{св}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{п2}}}{100} \right)^4 \right].$$

Перепад температур по сечению металла в начальном участке, °С:

$$\Delta t_2 = \frac{q_2 \delta}{2\lambda}.$$

Средняя температура и теплосодержание металла в начале участка, °С:

$$t_{\text{ср2}} = t_{\text{п2}} - \frac{2}{3} \Delta t_2.$$

4.13. Рассчитываем участок сварочной зоны с двухсторонним нагревом.
Средний удельный тепловой поток на участке, кВт/м²:

$$q''_{\text{ср}} = \frac{q_1 - q_2}{\ln \frac{q_1}{q_2}}.$$

Теплосодержание металла в конце участка сварочной зоны I_2 соответствует его средней температуре $t_{\text{ср}2}$.

Приращение теплосодержания на участке, кДж/кг:

$$\Delta I'_2 = I_2 - I_1,$$

где I_1 – теплосодержание на выходе из методической зоны; $I_1 = I_0 + \Delta I_1$.

Время нагрева металла на участке, ч:

$$\tau_2 = \frac{\Delta I'_2 S \rho}{q''_{\text{ср}}}.$$

4.14. Общее время нагрева металла, ч:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3.$$

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ПЕЧИ

5.1. Определение длины активного пода, м:

$$L_{\text{акт}} = \frac{\tau G}{2Sl\rho n}.$$

5.2. Определение длины зон, м:

- методическая зона $L_{\text{мет}} = L_{\text{акт}} \frac{\tau_1}{\tau}$;
- сварочная зона $L'_{\text{св}} = L_{\text{акт}} - (L_{\text{мет}} + L''_{\text{св}})$.

5.3. Определение площади пода, м²:

- активная – $F_{\text{акт}} = L_{\text{акт}} n l$;
- полезная – $F_{\text{пол}} = L_{\text{акт}} A$,

где A – ширина рабочего пространства, вычисленная в п. 3.1.

5.4. Определение напряженности пода, кг/(м²·ч):

- активная – $H_{\text{акт}} = \frac{G}{F_{\text{акт}}}$;
- полезная – $H_{\text{пол}} = \frac{G}{F_{\text{пол}}}$.

6. ТЕПЛОВЫЙ БАЛАНС ПЕЧИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ТОПЛИВА

6.1. Определяем потери тепла через кладку. В начале расчета необходимо определить боковую поверхность методической и сварочной зон за вычетом суммарной площади рабочих и смотровых окон.

Смотровые и рабочие окна располагаются симметрично с обеих сторон печи. Обычно размер окон принимают 350×465 мм. Расстояние между осями окон принимают: для рабочих окон – 1200÷1500 мм; для смотровых окон – 2000÷2500 мм. Смотровые окна располагаются в методической зоне и на участке сварочной зоны с двухсторонним обогревом. Рабочие окна располагаются на участке сварочной зоны с монолитным подом.

Рабочие и смотровые окна закрываются шамотным легковесом толщиной $\delta = 250$ мм.

Таблица 6.1 – Удельные потери тепла заслонками q , Вт/м²

Толщина футеровки, мм	Температура внутренней поверхности футеровки, °С					
	700	800	900	1000	1100	1200
250	800	970	1160	1395	1655	1935

Величина потерь тепла через закрытые окна (заслонки) определяется отдельно для методической и сварочной зон, Вт:

$$Q_{\text{засл}} = q \cdot F_{\text{ок}},$$

где $F_{\text{ок}}$ – суммарная площадь всех окон, м^2 ; q – удельные потери тепла, $\text{Вт}/\text{м}^2$ (табл. 6.1).

Для каждой зоны $F_{\text{ок}}$ определяется отдельно:

$$F_{\text{ок}} = (a \cdot b) \cdot n,$$

где a и b – размеры окон, м; n – количество окон в данной зоне.

Материалы стен и свода, а также их толщину выбираем из таблицы 6.2.

Таблица 6.2 – Данные для выбора кладки

Зона	Свод		Стены	
	Материал	Размер	Материал	Размер
методическая	шамот (А)	300	шамот (Б)	350
	пеношамот ПШ-0,8	150	пеношамот ПШ-0,8	120
сварочная	динас	300	шамот (А)	350
	изоляция	150	пеношамот ПШ-0,8	120

По таблице 6.3 определим удельные потери тепла через стены и свод печи.

Таблица 6.3 – Удельные потери тепла через стенки печи q , $\text{Вт}/\text{м}^2$

Толщина и материал стенки	Внутренняя температура стенки, °С					
	400	600	800	1000	1200	1400
Шамот $\delta = 230$ мм	1190	1910	2740	3610	4570	5650
Шамот $\delta = 350$ мм	823	1325	1890	2490	3170	3860
Шамот $\delta = 230$ мм и пеношамот $\delta = 120$ мм	297	490	716	955	1235	1540
Свод (динас)	-	-	-	3300	4300	5400

Температуру внутренней поверхности стен и свода можно рассчитать. Однако учитывая малый вклад потерь через кладку в тепловой баланс печи, можно принять среднюю температуру внутренней поверхности кладки: в методической зоне – на 100 °С ниже средней температуры газового потока в этой зоне; в сварочной зоне – на 150 °С ниже средней температуры газового потока.

Тепловые потери через стены или свод определяем по известному уравнению:

$$Q = q \cdot F,$$

где q – удельные потери через поверхность, Вт/м² (табл. 6.3); F – поверхность теплообмена, м².

Суммарные тепловые потери – через обмуровку и закрытые окна, МВт:

$$Q_{\text{кл}} = Q_{\text{бок.м}} + Q_{\text{бок.св}} + Q_{\text{св.м}} + Q_{\text{св.св}} + Q_{\text{засл}},$$

где $Q_{\text{бок.м}}$ – потери тепла через боковую поверхность методической зоны, МВт; $Q_{\text{бок.св}}$ – потери тепла через боковую поверхность сварочной зоны, МВт; $Q_{\text{св.м}}$ – потери тепла через свод методической зоны, МВт; $Q_{\text{св.св}}$ – потери тепла через свод сварочной зоны, МВт; $Q_{\text{засл}}$ – суммарные потери тепла через заслонки методической и сварочной зон.

6.2. Определяем потери тепла через окна печи. Эти потери зависят от температуры рабочего пространства перед окном, а также от того, закрыто оно или открыто. Поэтому расчет потерь тепла через окна целесообразно вести отдельно для сварочной и методической зон открытых и закрытых окон.

Потери тепла через закрытые окна $Q_{\text{окн}}$ определяются так же, как через кладку печи (по уравнению теплопередачи).

Суммарная потеря тепла через окно $Q_{\text{пот}}$ путем прямого и косвенного излучения может быть определена расчетным путем, Вт:

$$Q_{\text{пот}} = Q_{\text{луч}} \Phi = 5,67 \left(\frac{T_{\text{ср}}}{100} \right)^4 F \Phi \Theta,$$

где $T_{\text{ср}}$ – средняя температура печи, К; F – площадь отверстия окна, м^2 ; Φ – коэффициент диафрагмирования (см. приложение 9); Θ – доля времени, когда окно в печи открыто, ч. Для незакрываемых окон принять $\Theta = 1$.

Определяем размер окна загрузки-выгрузки.

Высота окна, м: $h = 6S$ (три толщины заготовки).

Длина окна, м: $l_{\text{ок}} = 2l + 0,75$, где l – длина заготовки, м.

6.3. Определяем потери тепла с охлаждающей водой. Основным источником потерь тепла с охлаждающей водой в печи являются продольные и поперечные подовые трубы. В печи можно установить четыре продольные трубы диаметром 76 мм и количество Z (в зависимости от длины подовых труб) сдвоенных опорных труб такого же диаметра, которые устанавливаются через $1,2 \div 1,3$ м.

$$Z = \frac{L_{\text{мет}} + L'_{\text{св}}}{1,2}.$$

Потери тепла рассчитываем на неизолированные трубы, кВт:

$$Q_{\text{охл}} = q_{\text{охл}} F_{\text{тр}},$$

где $q_{\text{охл}}$ – удельные тепловые потери на охлаждение, $\text{Вт}/\text{м}^2$. Определяются по рисунку 6.1 отдельно для методической и сварочной зон.

Поверхность глissажных труб для методической зоны, м^2 :

$$F_{\text{тр}}^{\text{мет}} = \pi d (A \cdot 2Z_{\text{мет}} + 4L_{\text{мет}}),$$

где A – ширина печи, м; $Z_{\text{мет}} = \frac{L_{\text{мет}}}{1,2}$ – число опорных труб в методической зоне.

Поверхность глissажных труб для сварочной зоны, м^2 :

$$F_{\text{тр}}^{\text{св}} = \pi d (A \cdot 2Z_{\text{св}} + 4L'_{\text{св}}),$$

где $Z_{\text{св}} = \frac{L'_{\text{св}}}{1,2}$ – число опорных труб в сварочной зоне.

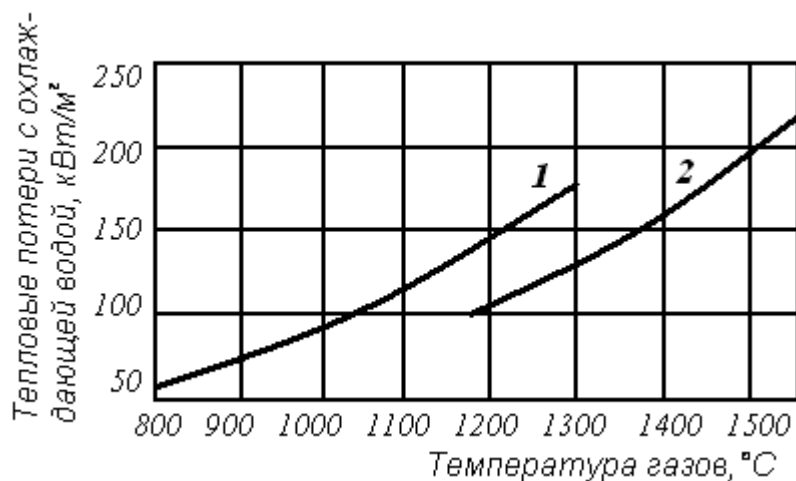


Рисунок 6.1 – Зависимости тепловых потерь с охлаждающей водой от температуры газов:
1 – для методической зоны; 2 – для сварочной зоны

Общие потери тепла с охлаждающей водой, кВт:

$$Q_{\text{охл}} = 1,1 (Q_{\text{охл}}^{\text{св}} + Q_{\text{охл}}^{\text{мет}}).$$

Коэффициент 1,1 учитывает потери тепла остальных водоохлаждаемых элементов печи (отбойники, крышки и др.).

6.4. Расход тепла на нагрев металла. Общее количество тепла, усвоенное металлом, МВт:

$$Q_{\text{м}} = G \Delta t;$$

Тепло, выделенное при окислении железа, МВт:

$$Q_{\text{экз}} = \frac{5650 G \delta}{100},$$

где δ – угар металла (по практическим данным $\delta = 2 \%$).

Потери тепла с окалиной, МВт:

$$Q_{\text{ок}} = G_{\text{ок}} I_{\text{ок}},$$

где $G_{\text{ок}}$ – количество окалины, кг/ч.

$$G_{\text{ок}} = \frac{\delta G m}{100},$$

где m – количество окалины, получившейся при окислении 1 кг железа ($m = 1,38$ кг/кг).

Теплосодержание окалины, МДж/кг:

$$I_{\text{ок}} = c_{\text{ок}} t_{\text{п.к}},$$

где $c_{\text{ок}}$ – теплоемкость окалины, равная 1,26 кДж/кг.

Тепло, усвоенное металлом от окисления железа, МВт:

$$Q_{\text{усв}} = Q_{\text{экз}} - Q_{\text{ок}}.$$

Тепло, усвоенное металлом от горения топлива, МВт:

$$Q_{\text{усв.топ}} = Q_{\text{м}} - Q_{\text{усв}}.$$

6.5. Общие потери тепла печью, МВт:

$$Q_{\text{п}} = 1,1(Q_{\text{кл}} + Q_{\text{ок}} + Q_{\text{охл}}).$$

Коэффициент 1,1 принимается для запаса в связи с неполным учетом всех потерь тепла (выбивания газов и др.).

6.6. Тепловые мощности и расход топлива. Полезная тепловая мощность, МВт:

$$M_{\text{пол}} = \frac{Q_{\text{усв}}}{\eta_{\text{общ}}}.$$

Мощность холостого хода, МВт:

$$M_{\text{х.х}} = \frac{Q_{\text{п}}}{\eta_{\text{общ}}}.$$

Общая тепловая мощность, МВт:

$$M_{\text{общ}} = M_{\text{пол}} + M_{\text{х.х}}.$$

Сравниваем полученную мощность с принятой в пункте 4.7.

Часовой расход топлива, м³/ч:

$$B = \frac{M_{\text{общ}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}.$$

Удельный расход тепла, кДж/кг:

$$q_{\text{уд}} = \frac{M_{\text{общ}}}{G}.$$

Удельный расход условного топлива, кг/т:

$$b_{\text{уд}} = \frac{q_{\text{уд}} \cdot 1000}{29400}.$$

Коэффициент полезного действия печи, %:

$$\eta' = \frac{Q_{\text{усв. топ}} \cdot 100}{M_{\text{общ}}}.$$

Уточненная величина потерь тепла с уходящими газами, МВт:

$$Q_{\text{ух}} = q_{\text{ух}} B.$$

7. РАСЧЕТ РЕКУПЕРАТОРА ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЯ

В методических печах применяются рекуператоры для подогрева воздуха дутья. Керамические рекуператоры позволяют вести высокотемпературный нагрев воздуха до 800 °С, однако они обладают недостаточной газоплотностью (потери воздуха до 30 %).

Наиболее широко используются в методических печах петлевые металлические рекуператоры из труб $d = 57 / 49$, с коридорным расположением и шагом $\frac{x_1}{d} = \frac{x_2}{d} = 2$.

В качестве исходных данных задается:

- часовой расход топлива B , м³/ч;
- действительный расход воздуха на 1 м³ топлива V_d , м³/м³;
- объем продуктов сгорания $V_{п.с}$, м³/м³;
- температура подогрева воздуха $t''_в$, °С;
- температура уходящих газов из печи t_{yx} , °С.

Порядок расчета

7.1. Определяем расход воздуха через рекуператор, м³/ч:

$$V_в = B V_d.$$

7.2. Расход продуктов сгорания, м³/ч:

$$V_г = B V_{п.с}.$$

7.3. Количество продуктов сгорания переходящего через рекуператор с учетом выбивания газов и байпасирования через обводной шибер:

$$V'_г = m V_г (1 + \rho),$$

где m – коэффициент, учитывающий потери газа в печи и по тракту (принять $m = 0,8$); ρ – коэффициент, учитывающий подсос воздуха в боровых ($\rho \approx 0,1$).

7.4. Энтальпия продуктов сгорания с учетом подсоса воздуха

$$i'_г = \frac{i_{yx}}{1 + \rho},$$

где i_{yx} – энтальпия уходящих газов при температуре выхода из печи.

По полученной действительной энтальпии продуктов сгорания находим соответствующую температуру (см. приложение 5).

7.5. Определяем энтальпию продуктов сгорания за рекуператором.

$$i''_{\Gamma} = i'_{\Gamma} - \frac{V_{\text{B}} (i''_{\text{B}} - i'_{\text{B}})}{V'_{\Gamma} \xi},$$

где i''_{B} – конечная энтальпия воздуха за рекуператором; i'_{B} – энтальпия холодного воздуха; ξ – коэффициент тепловых потерь в окружающую среду ($\xi \approx 0,9$).

По приложению 5 находим температуру продуктов сгорания за рекуператором.

7.6. Среднелогарифмический температурный напор

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{(t'_{\Gamma} - t''_{\text{B}}) - (t''_{\Gamma} - t'_{\text{B}})}{\ln \frac{t'_{\Gamma} - t''_{\text{B}}}{t''_{\Gamma} - t'_{\text{B}}}}.$$

7.7. Коэффициент теплопередачи в рекуператоре упрощенно определяем без учета термического сопротивления стенки трубы

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha'} + \frac{1}{\alpha''}},$$

где α' – коэффициент теплоотдачи по газовой стороне, Вт/м²·К; α'' – коэффициент теплоотдачи по воздушной стороне, Вт/м²·К.

Со стороны газов учитываем лучистую и конвективную составляющие теплообмена:

$$\alpha' = \alpha'_{\text{луч}} + \alpha'_{\text{конв}},$$

где $\alpha'_{\text{луч}}$ – коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/м²·К; $\alpha'_{\text{конв}}$ – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/м²·К.

Эффективная толщина газового слоя, м:

$$S = \left[1,87 \frac{x_1 + x_2}{d_{\text{H}}} - 4,1 \right] d_{\text{H}}.$$

Средняя температура продуктов сгорания в рекуператоре, °C:

$$\bar{t}_r = \frac{t'_r + t''_r}{2}.$$

По номограмме (рис. 7.1), согласно полученным S и \bar{t}_r , определяем лучистую составляющую теплообмена $\alpha'_{\text{луч}}$, Вт/м²·К.

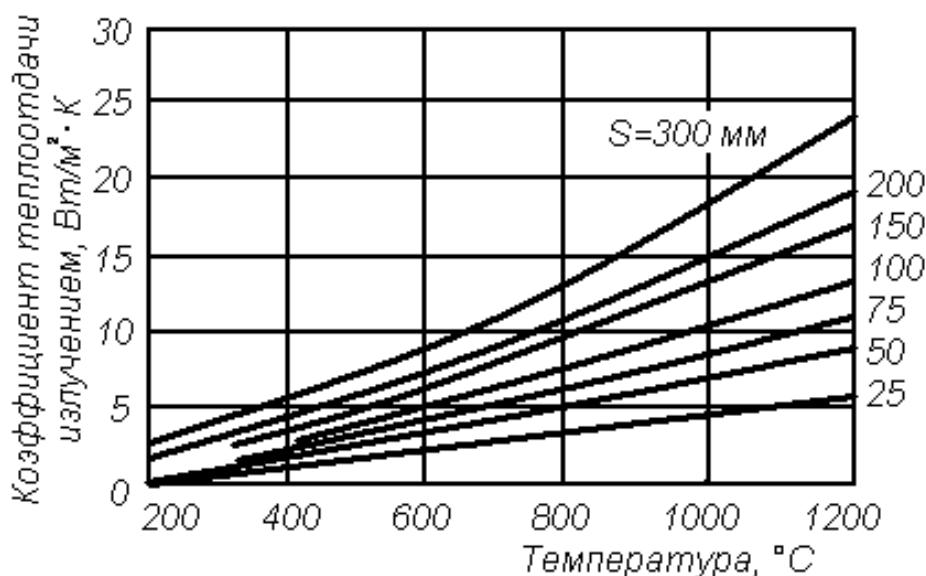


Рисунок 7.1 – График зависимости коэффициента теплоотдачи излучением от температуры газов и толщины газового слоя

Конвективную составляющую теплообмена по газовой стороне определяем по эмпирической зависимости:

$$\alpha'_{\text{конв}} = (7,4 + 0,00924 \bar{t}_r) \frac{W_r^{0,65}}{d_{\text{н}}^{0,35}},$$

где W_r – скорость движения газов (принимается 4÷5 м/с).

Коэффициент теплоотдачи по воздушной стороне α'' определяем по соотношению:

$$\alpha'' = (3,57 + 0,00174 \bar{t}_b) \frac{W_b^{0,8}}{d_{\text{вн}}^{0,2}},$$

где $t_B = \frac{t'_B + t''_B}{2}$ – средняя температура воздуха; W_B – скорость воздуха в трубках (принимается $8 \div 12$ м/с).

Определив коэффициент теплопередачи K в пункте 7.7, уточняем его величину с учетом возможного загрязнения поверхности нагрева, Вт/м²·К:

$$K_y = 0,85 K.$$

7.8. Определим поверхность нагрева рекуператора, м²:

$$F = \frac{V_B (i''_B - i'_B) \cdot 10^6}{K_y \cdot \Delta t_{cp} \cdot 3600}.$$

7.9. Производим компоновку рекуператора. Определим число U-образных элементов в каждой секции, шт.:

$$Z = \frac{4V_B}{3600 \pi d_{BH}^2 W_B}.$$

Средняя поверхность нагрева одного трубного элемента, м²:

$$f_{cp} = \frac{F}{Z}.$$

Средняя длина одного трубного элемента, м:

$$l_{cp} = \frac{f_{cp}}{\pi d_{cp}},$$

где $d_{cp} = \frac{d_H + d_{BH}}{2}$ – средний диаметр трубки петлевого рекуператора, м.

Число труб в ряду, перпендикулярном движению газов, шт.:

$$Z_1 = \frac{V'_\Gamma}{3600 (x_1 - d_H) \frac{l_{cp}}{2} W_\Gamma},$$

где $x_1 = 2d_H$.

Число труб по ходу газов в каждой секции рекуператора, шт.:

$$Z_2 = \frac{Z}{2Z_1}.$$

Схема петлевого рекуператора представлена на рисунке 7.2.

Выход воздуха Вход воздуха

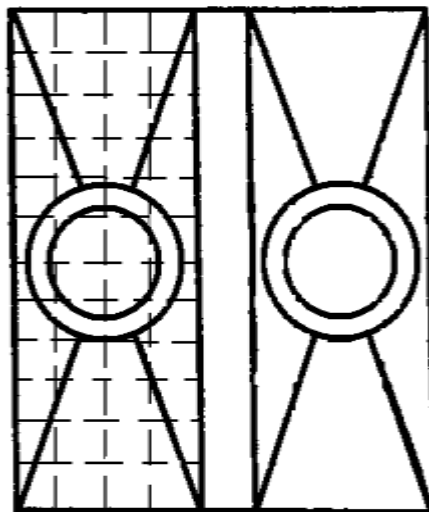
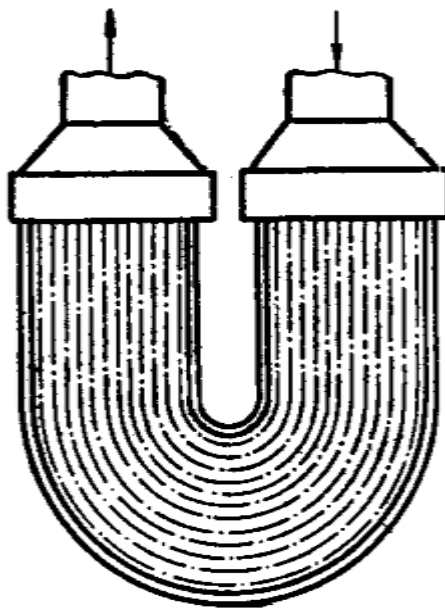
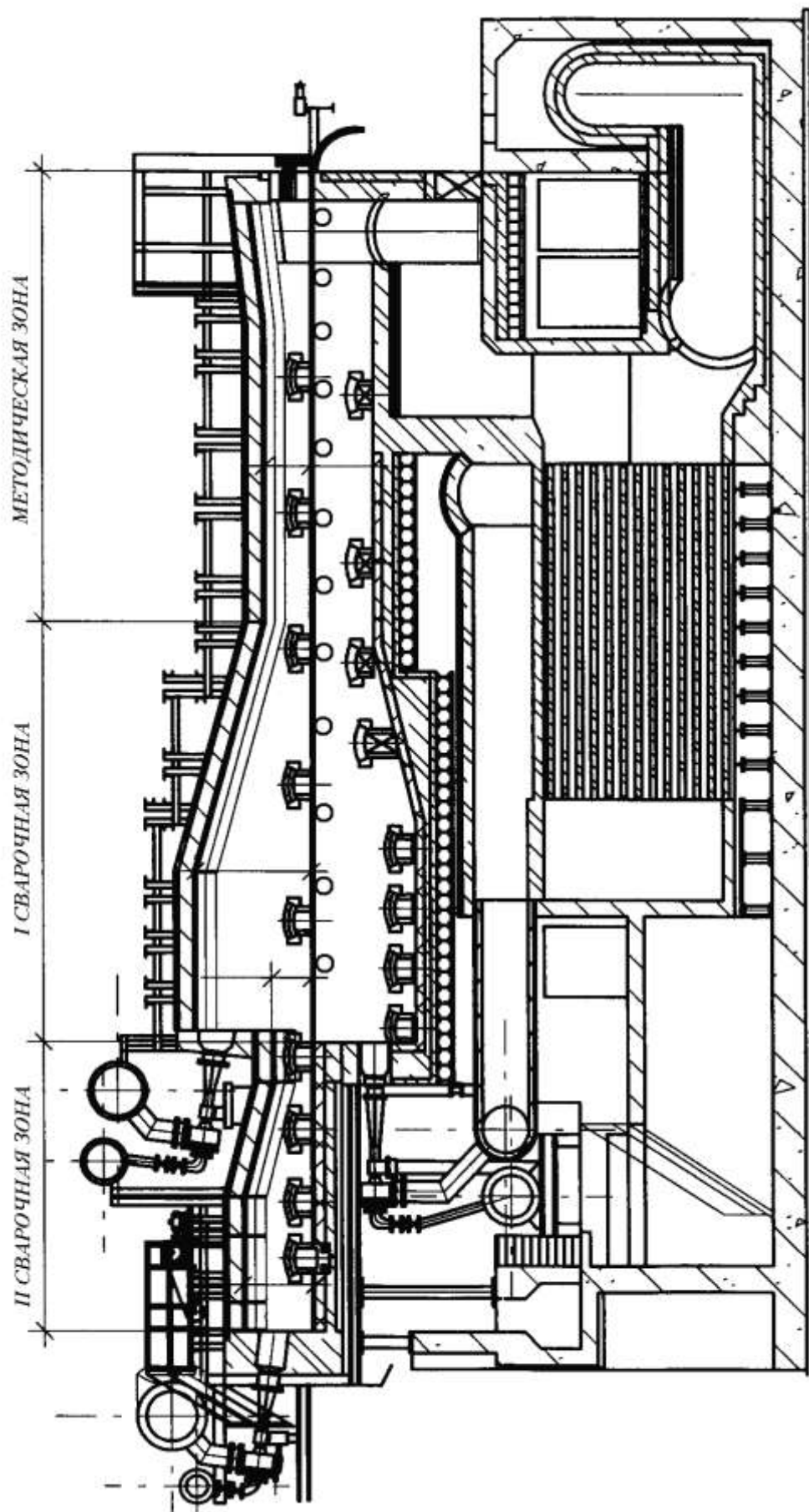


Рисунок 7.2 – Схема петлевого рекуператора

ОБЩИЙ ПРИЛ
ВИД ОЖЕН
МЕТОДИЧЕ ИЕ 1



ПРИЛОЖЕНИЕ 2

СРЕДНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ ДЛЯ ВОЗДУХА И ГАЗОВ

Температура		CO ₂	N	O ₂	H ₂ O	Воздух сухой
К	°C	кДж/м ³ ·°C	кДж/м ³ ·°C	кДж/м ³ ·°C	кДж/м ³ ·°C	кДж/м ³ ·°C
273	0	1,6204	1,3327	1,3076	1,4914	1,3009
373	100	1,7200	1,3013	1,3193	1,5019	1,3051
473	200	1,8079	1,3030	1,3369	1,5174	1,3097
573	300	1,8808	1,3080	1,3583	1,5379	1,3181
673	400	1,9436	1,3172	1,3796	1,5592	1,3302
773	500	2,0453	1,3294	1,4005	1,5831	1,3440
873	600	2,0592	1,3419	1,4152	1,6078	1,3583
973	700	2,1077	1,3553	1,4370	1,6338	1,3725
1073	800	2,1517	1,3683	1,4529	1,6601	1,3821
1173	900	2,1915	1,3817	1,4663	1,6865	1,3993
1273	1000	2,2266	1,3938	1,4801	1,7133	1,4118
1373	1100	2,2593	1,4056	1,4935	1,7397	1,4236
1473	1200	2,2886	1,4065	1,5065	1,7657	1,4347
1573	1300	2,3158	1,4290	1,5123	1,7908	1,4453
1673	1400	2,3405	1,4374	1,5220	1,8151	1,4550
1773	1500	2,3636	1,4470	1,5312	1,8389	1,4642
1873	1600	2,3849	1,4554	1,5400	1,8619	1,4730
1973	1700	2,4042	1,4625	1,5483	1,8841	1,4809
2073	1800	2,4226	1,4705	1,5559	1,9055	1,4889
2173	1900	2,4393	1,4780	1,5638	1,9252	1,4960
2273	2000	2,4552	1,4851	1,5714	1,9449	1,5031
2373	2100	2,4699	1,4914	1,5743	1,9633	1,5094
2473	2200	2,4837	1,4981	1,5851	1,9813	1,5174
2573	2300	2,4971	1,5031	1,5923	1,9984	1,5220
2673	2400	2,5097	1,5085	1,5990	1,0148	1,5274
2773	2500	2,5214	1,5144	1,6057	1,0307	1,5341

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ 2
СРЕДНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ ДЛЯ ВОЗДУХА И ГАЗОВ

Температура		CO	H ₂	H ₂ S	CH ₄	C ₂ H ₄
К	°C	кДж/м ³ ·°C	кДж/м ³ ·°C	кДж/м ³ ·°C	кДж/м ³ ·°C	кДж/м ³ ·°C
273	0	1,3021	1,2777	1,5156	1,5558	1,7669
373	100	1,3021	1,2896	1,5407	1,6539	2,1060
473	200	1,3105	1,2979	1,5742	1,7669	2,3280
573	300	1,3231	1,3021	1,6077	1,8925	2,5289
673	400	1,3315	1,3021	1,6454	2,0223	2,7215
773	500	1,3440	1,3063	1,6832	2,1437	2,8932
873	600	1,3607	1,3105	1,7208	2,2693	3,0481
973	700	1,3733	1,3147	1,7585	2,3824	3,1905
1073	800	1,3901	1,3189	1,7962	2,4954	3,3412
1173	900	1,4026	1,3230	1,8297	2,5959	3,4500
1273	1000	1,4152	1,3273	1,8632	2,6964	3,5673
1373	1100	1,4278	1,3356	1,8925	2,7843	—
1473	1200	1,4403	1,3440	1,9218	2,8723	—
1573	1300	1,4487	1,3524	1,9469	—	—
1673	1400	1,4613	1,3608	1,9721	—	—
1773	1500	1,4696	1,3691	1,9972	—	—
1873	1600	1,4780	1,3775	—	—	—
1973	1700	1,4864	1,3859	—	—	—
2073	1800	1,4947	1,3942	—	—	—
2173	1900	1,4890	1,3983	—	—	—
2273	2000	1,5073	1,4067	—	—	—
2373	2100	1,5115	1,4151	—	—	—
2473	2200	1,5198	1,4235	—	—	—
2573	2300	1,5241	1,4318	—	—	—
2673	2400	1,5284	1,4360	—	—	—
2773	2500	1,5366	1,4445	—	—	—

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ХРОМИСТЫХ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ λ , Вт/м·К (ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ)

Марка стали	Температура, °С												
	30	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
X13	26,7	27,7	27,7	28,0	27,7	27,2	26,4	25,5	25,1	26,1	27,7	28,8	30,5
X13	27,3	26,9	26,4	26,1	26,1	26,3	26,7	27,2	—	—	—	—	—
2X13	24,3	25,5	25,8	26,3	26,4	26,6	26,4	26,2	26,7	27,6	—	—	—
2X13	20,5	22,1	23,6	24,6	25,6	26,2	26,7	27,3	27,9	28,9	—	—	—
3X13	25,1	26,4	27,2	27,7	27,7	26,1	26,7	25,6	25,1	26,7	27,7	28,8	30,1
3X13	—	25,6	25,1	25,6	25,6	25,6	25,6	24,6	—	—	—	—	—
4X13	28,8	28,0	29,1	29,3	29,2	27,7	28,4	28,0	—	—	—	—	—
X17	—	24,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
X28	—	20,8	21,7	22,7	23,4	24,3	25,0	—	—	—	—	—	—

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЕ ЖЕЛЕЗА И УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ, кДж/кг

Темпера- тура, °С	Чистое железо	Содержание углерода, %										
		0,090	0,234	0,30	0,540	0,610	0,795	0,920	0,994	1,235	1,410	1,575
100	46,5	46,5	46,5	46,9	47,3	47,7	48,1	50,2	48,6	49,4	48,6	50,2
200	98,0	95,46	95,9	95,9	95,9	96,3	96,7	100,5	99,2	100,0	98,8	100,9
300	153,2	148,2	149,9	151,6	151,6	152,8	154,5	155,7	154,5	154,9	154,5	157,0
400	214,4	205,2	206,6	208,9	208,9	209,8	210,2	213,5	211,0	213,1	210,6	213,9
500	280,5	265,4	266,7	268,4	268,4	269,2	271,3	275,9	274,1	276,2	274,1	276,8
600	356,7	339,1	340,0	343,3	343,3	343,7	344,6	349,6	346,3	347,5	345,4	351,3
700	421,6	419,1	419,5	422,9	422,9	423,7	424,6	427,5	421,9	427,9	425,4	431,3
800	505,03	531,7	542,6	547,7	547,7	542,2	550,2	550,2	544,3	548,5	544,3	553,9
900	584,09	629,3	631,4	620,1	620,1	616,7	610,9	602,9	605,0	602,9	605,8	613,8
1000	675,24	704,2	701,7	689,2	689,2	686,7	679,1	653,6	670,7	661,1	673,3	670,9
1100	744,24	780,9	772,5	760,8	760,8	757,4	749,5	724,8	741,1	732,3	744,9	720,2
1200	815,50	850,4	844,5	831,5	831,5	820,6	821,1	791,3	804,3	795,5	813,1	783,0
1250	—	855,5	880,1	868,8	868,8	876,3	856,2	824,8	841,6	833,2	849,5	817,7

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЕ ГАЗОВ i , кДж/м³

Темпе- ратура, °С	Газ									
	CO ₂	H ₂ O	Воз- дух	N ₂	O ₂	H ₂	CO	SO ₂	CH ₄	C ₂ H ₄
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
100	171,3	150,0	130,0	130,0	132,3	129,2	130,2	182,0	160,9	210,1
200	360,6	302,4	261,9	261,6	267,2	259,6	261,5	379,2	349,4	465,9
300	563,9	418,7	395,7	394,6	409,4	390,6	395,7	589,5	563,2	759,5
400	777,1	623,4	533,0	530,1	551,4	521,7	532,2	810,2	800,7	1080,0
500	1001,1	690,2	672,4	667,8	699,6	654,0	671	1037,9	1060,2	1447,0
600	1236,4	964,3	814,7	389,4	850,8	785,9	802,2	1272,4	1341,8	1830,5
700	1475,1	1143,0	959,0	950,9	1004,5	919,5	960,7	1510,7	1549,5	2233,8
800	1718,8	1328,9	1106,9	1098,7	1160,5	1086,9	1110,3	1751,8	1968,3	2675,5
900	1967,5	1526,8	1259,4	1247,7	1320,2	1041,3	1261,1	1997,6	2300,3	2991,2
1000	2219,5	1721,0	1412,3	1399,3	1479,7	1330,2	1414,4	2243,8	2647,0	3564,8
1100	2476,6	1910,9	1564,9	1553,8	1629,0	1469,6	1570,1	2655,5	-	-
1200	2732,8	2113,6	1721,7	1708,3	1802,5	1614,5	1726,3	2738,3	-	-
1300	2992,4	2321,1	1879,5	1862,8	1970,0	1758,5	1926,8	2994,9	-	-
1400	3256,3	2536,3	2038,6	2021,9	2133,5	1904,2	2042,8	3246,2	-	-
1500	3520,0	2750,9	2272,7	2180,6	2298,2	2072,5	2199,8	3497,4	-	-
1600	3784,6	2977,4	2355,6	2337,6	2463,2	2200,3	2361,5	3747,4	-	-
1700	4049,7	3204,6	2515,5	2496,7	2629,8	2350,5	2521,8	4005,3	-	-
1800	4316,8	3430,4	2677,2	2660,0	2801,5	2505,7	2683,9	4262,4	-	-
1900	4584,8	3656,1	2836,3	2818,7	2974,9	2658,7	2847,2	4932,3	-	-
2000	4852,7	3889,7	3000,4	1871,0	3146,6	2813,7	3007,9	4651,7	-	-
2100	5124,8	4127,5	3162,4	3142,7	3315,3	2970,2	3174,2	5024,4	-	-
2200	5397,0	4362,8	3321,1	3309,0	3485,7	3132,3	3337,5	5284,0	-	-
2300	5669,2	4601,5	3510,3	3472,3	3661,1	3291,8	3502,4	5539,4	-	-
2400	5937,2	4840,1	3650,2	3636,4	3838,2	3452,6	3667,8	5799,0	-	-
2500	6213,5	5078,8	3820,6	3802,2	4012,3	3615,5	3834,8	6054,4	-	-
2600	5481,4	5325,8	3983,5	3968,8	4191,2	3779,1	4002,7	6309,8	-	-
2700	6753,6	5564,5	4151,8	4131,3	4362,8	3940,0	4166,9	6569,4	-	-

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИПИЧНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПЕЧЕЙ

Материал	Объемная масса, кг/м ³	Коэффициент теплопровод- ности λ , Вт/м·К	Истинная теплоемкость, $C_{ист}$, кДж/кг·К	Средняя теплоемкость C_0 , кДж/кг·К
Динас	1980	$1,046 + 0,93 \frac{t}{1000}$	$0,699 + 1,67 \frac{t}{1000}$	$0,699 + 0,837 \frac{t}{1000}$
Шамот	1860	$0,7 + 0,64 \frac{t}{1000}$	$0,808 + 0,628 \frac{t}{1000}$	$0,808 + 0,314 \frac{t}{1000}$
Магнезит	2700	$4,31 + 0,512 \frac{t}{1000}$	$t > 260^\circ$ $1,017 + 0,335 \frac{t}{1000}$	$t > 260^\circ$ $\frac{19,26}{t} + 1,006 + 0,167 \frac{t}{1000}$
Хромо- магнезит	2870	1,98	$0,712 + 0,774 \frac{t}{1000}$	$0,712 + 0,389 \frac{t}{1000}$
Высоко- глино- земистые огнеупоры	—	—	$t > 500^\circ$ $0,964 + 0,18 \frac{t}{1000}$	$t > 500^\circ$ $\frac{7,12}{t} + 0,964 + 0,1947 \frac{t}{1000}$
Красный кирпич	1600	$0,466 + 0,512 \frac{t}{1000}$	По формуле для шамота	По формуле для шамота
Шамотный легковес	1250	$0,312 + 0,477 \frac{t}{1000}$	То же	То же
Пено- шамотный кирпич	600	$0,1046 + 0,145 \frac{t}{1000}$	—“—	—“—
Пенодинас	1200	$0,465 + 0,465 \frac{t}{1000}$	—“—	—“—

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ТОЛЩИНА КЛАДКИ И ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Элементы кладки	Темпе- ратура, °С	Внутренний слой		Слой теплоизоляции	
		Тол- щина, мм	Материал	Тол- щина, мм	Материал
Стены высотой до 1 м	До 1200	120	Шамот класса В	250	Трепеловый или диатомитовый кирпич
Стены высотой более 1 м	До 1200	250	То же	250	—«—
Стены высотой до 1 м	Выше 1200	230	Шамот класса Б	120–250	—«—
Стены высотой более 1 м	Выше 1200	230–350	Шамот класса А	120–250	—«—
Своды печей с пролетом до 1 м	До 1000	120	Шамот класса Б	120–150	Изоляционная засыпка
Своды печей с пролетом до 3,5 м	До 1000	230	Шамот класса Б	150–200	—«—
Своды печей с пролетом более 3,5 м	До 1000	300	Шамот класса Б	150–200	—«—
Своды печей с пролетом до 1 м	1000 – 1200	120	Шамот класса А	120–150	—«—
Своды печей с пролетом до 3,5 м	1000 – 1200	230	Шамот класса А	150–200	—«—
Своды печей с пролетом более 3,5 м	1000 – 1200	300	Шамот класса А	150–200	—«—
Своды печей с пролетом до 1 м	Выше 1200	230	Шамот класса А	120–150	—«—
Своды печей с пролетом до 3,5 м	Выше 1200	300	Динас или шамот класса А	150–200	—«—
Своды печей с пролетом более 3,5 м	Выше 1200	300	Динас или шамот класса А	150–200	—«—

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

МАКСИМАЛЬНАЯ ДОПУСТИМАЯ ТЕМПЕРАТУРА КЛАДКИ

Шамотный кирпич:

класс А	1300 – 1400 °С
класс Б	1250 – 1300 °С
класс В	1200 – 1250 °С

Динасовый кирпич 1600 – 1680 °С

Магнезитовый кирпич 1650 – 1700 °С

Хромомагнезитовая набивка 1550 – 1600 °С

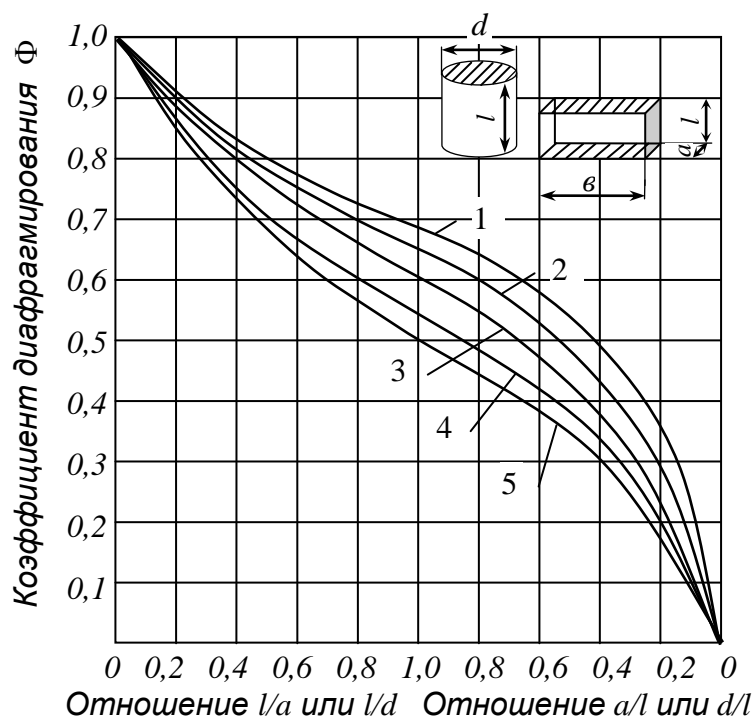
Шамотный легковесный кирпич 1200 – 1350 °С

Трепельный кирпич 800 – 850 °С

Красный кирпич до 780 °С

ПРИЛОЖЕНИЕ 9

КОЭФФИЦИЕНТ ДИАФРАГМИРОВАНИЯ



1 – длинные полосы, $a : v = 0$; 2 – прямоугольники, $a : v = 0,2$;
 3 – то же, $a : v = 0,5$; 4 – квадраты, $a : v = 1$; 5 – круги

ПРИЛОЖЕНИЕ 10

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ λ , Вт/м·К, УГЛЕРОДИСТЫХ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Темпе- ратура, К	Углеродистые стали			Хромистые стали 0,7 – 1,1 % Cr	Низколегированные стали					
	0,05 – 0,2 % C	0,2 – 0,5 % C	0,6 – 1,3 % C		1,2 – 1,8 % Mn	1,3 – 1,6 % Cr; 1,0 – 1,6 % Si	1,1 – 1,4 % Si; 1,1 – 1,4 % Mn	0,8 – 1,3 % Cr; 0,15 – 0,55 % Mo	0,8 – 1,1 % Cr; 0,1 – 0,2 % V	0,45 – 0,9 % Cr; 1,0 – 3,15 % Ni
373	55,6	49,3	46,6	44,8	41,8	-	41,6	43,9	52,4	38,4
473	52,8	48,2	44,0	42,3	40,1	38,8	41,6	41,9	48,7	37,9
573	48,0	45,6	40,8	39,3	38,9	-	39,4	41,4	-	36,8
673	45,0	42,5	37,7	36,4	37,0	36,0	39,0	39,4	45,4	36,8
773	40,8	39,1	35,0	-	35,3	33,5	36,3	36,6	41,9	34,8
873	37,1	36,9	32,4	32,6	34,3	32,6	34,9	32,4	-	32,5
973	34,2	32,5	29,2	-	30,8	-	33,8	29,8	-	28,1
1073	30,1	26,2	24,1	26,7	26,4	26,8	32,6	29,1	-	27,1
1173	27,4	26,1	25,3	-	-	-	-	28,5	-	26,4
1273	27,9	26,9	26,5	-	-	-	-	-	-	27,7
1373	28,5	28,1	27,9	-	-	-	-	-	-	28,9
1473	29,8	29,6	29,5	-	-	-	-	-	-	-

ПРИЛОЖЕНИЕ 11

СРЕДНЯЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ, кДж/кг·К, УГЛЕРОДИСТЫХ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Температура, К	Углеродистые стали	Низколегированные стали
373	0,486	0,486
473	0,507	0,503
573	0,524	0,520
673	0,536	0,536
773	0,561	0,549
873	0,591	0,586
973	0,620	0,645
1073	0,695	0,695
1173	0,695	0,686
1273	0,691	0,675
1373	0,687	0,670
1473	0,683	0,670
1573	0,683	-

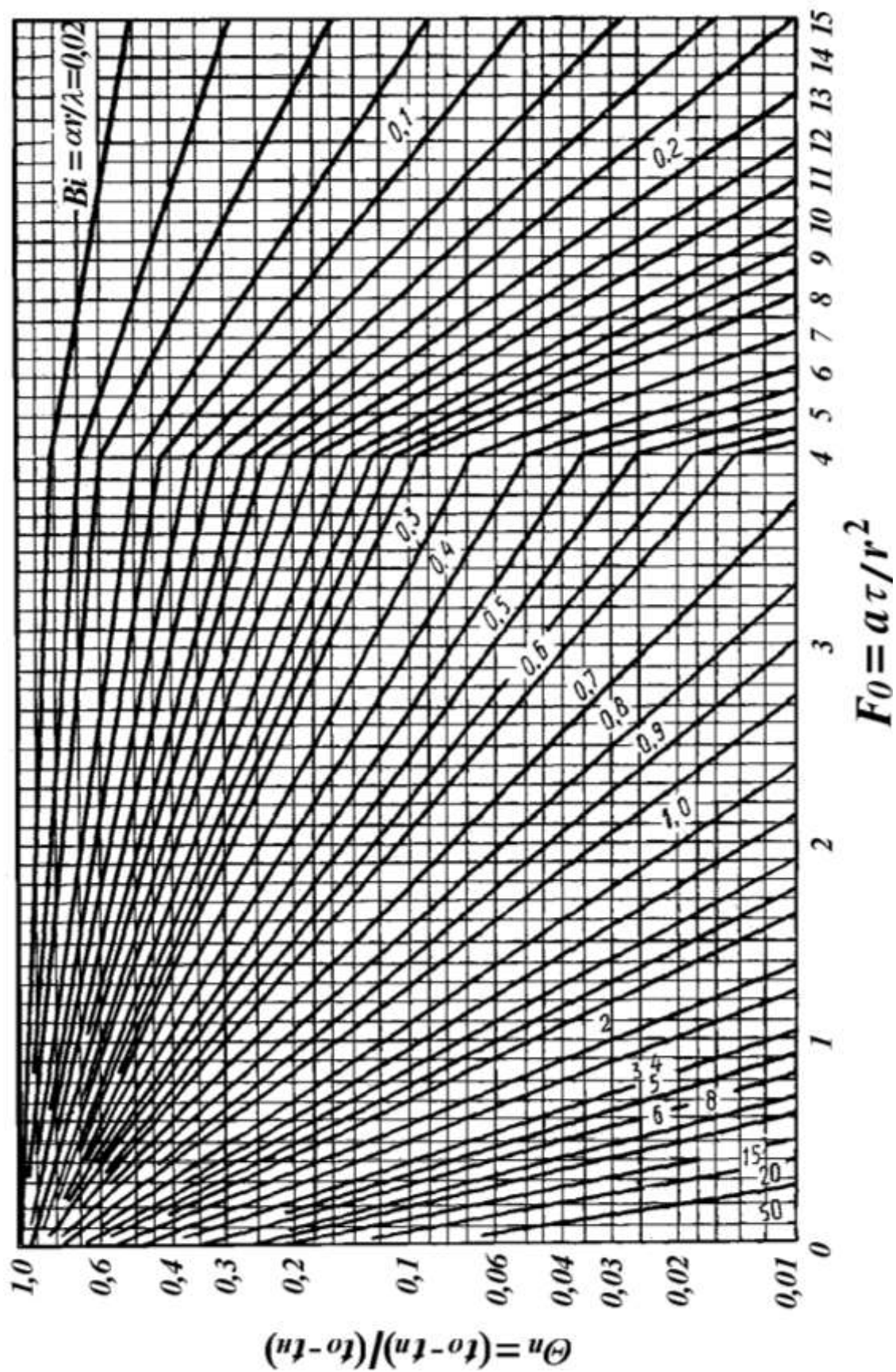
ПРИЛОЖЕНИЕ 12

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ, Вт/м·К

Марка стали	Температура, °С												
	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
08	65,1	60,2	55,6	50,9	46,5	41,0	37,4	34,0	30,1	27,2	27,7	28,5	29,8
10	59,5	57,7	53,5	49,4	44,8	40,2	36,0	31,9	28,5	26,7	27,7	28,5	29,8
15	52,3	53,4	53,3	49,3	46,0	42,8	39,1	35,7	32,1	29,5	28,8		
20	51,9	51,0	48,5	44,4	42,7	39,3	35,6	31,9	25,9	26,4	27,7	28,5	29,8
35	47,9	49,4	49,1	46,5	43,7	40,6	37,9	34,8	28,6	28,0			
40	51,9	50,6	48,1	45,6	41,9	38,1	33,5	30,0	24,8	25,7	26,9	28,0	29,5
45	48,1	48,1	46,5	44,0	41,0	38,5	36,0	31,4	26,7	25,9	26,7	28,0	29,8
У8	50,4	48,6	45,6	41,6	38,3	35,4	33,0	30,4	24,3	25,4	26,9	28,6	29,8
У9	48,7	48,8	48,3	45,8	42,9	39,9	36,9	32,8					
У12	45,2	44,8	42,7	40,2	37,2	34,6	32,0	28,3	23,7	24,8	26,0	27,2	28,6

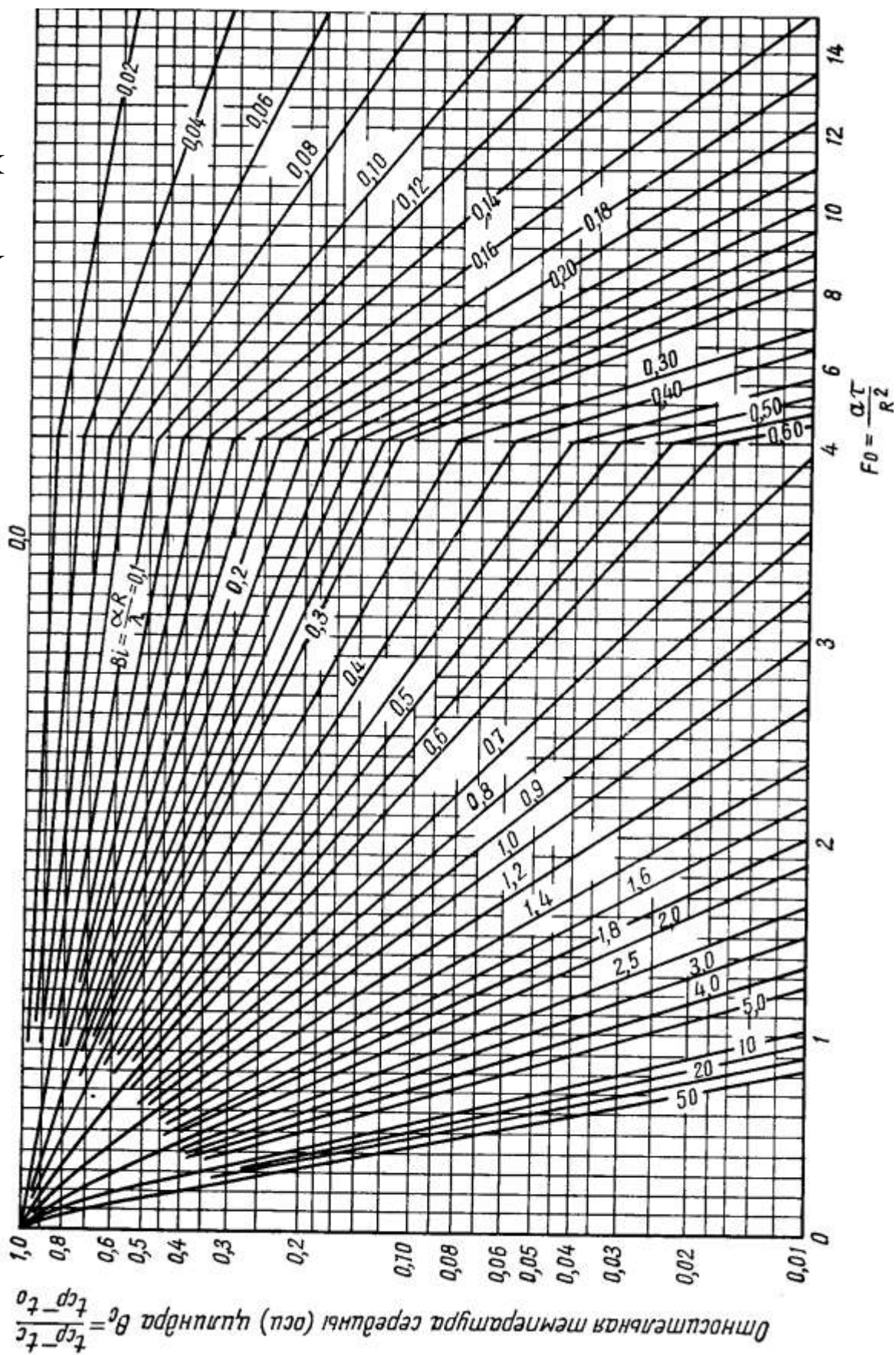
ПРИЛОЖЕНИЕ 13

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ИЗБЫТОЧНАЯ ТЕМПЕРАТУРА
ПОВЕРХНОСТИ БЕСКОНЕЧНОГО ЦИЛИНДРА



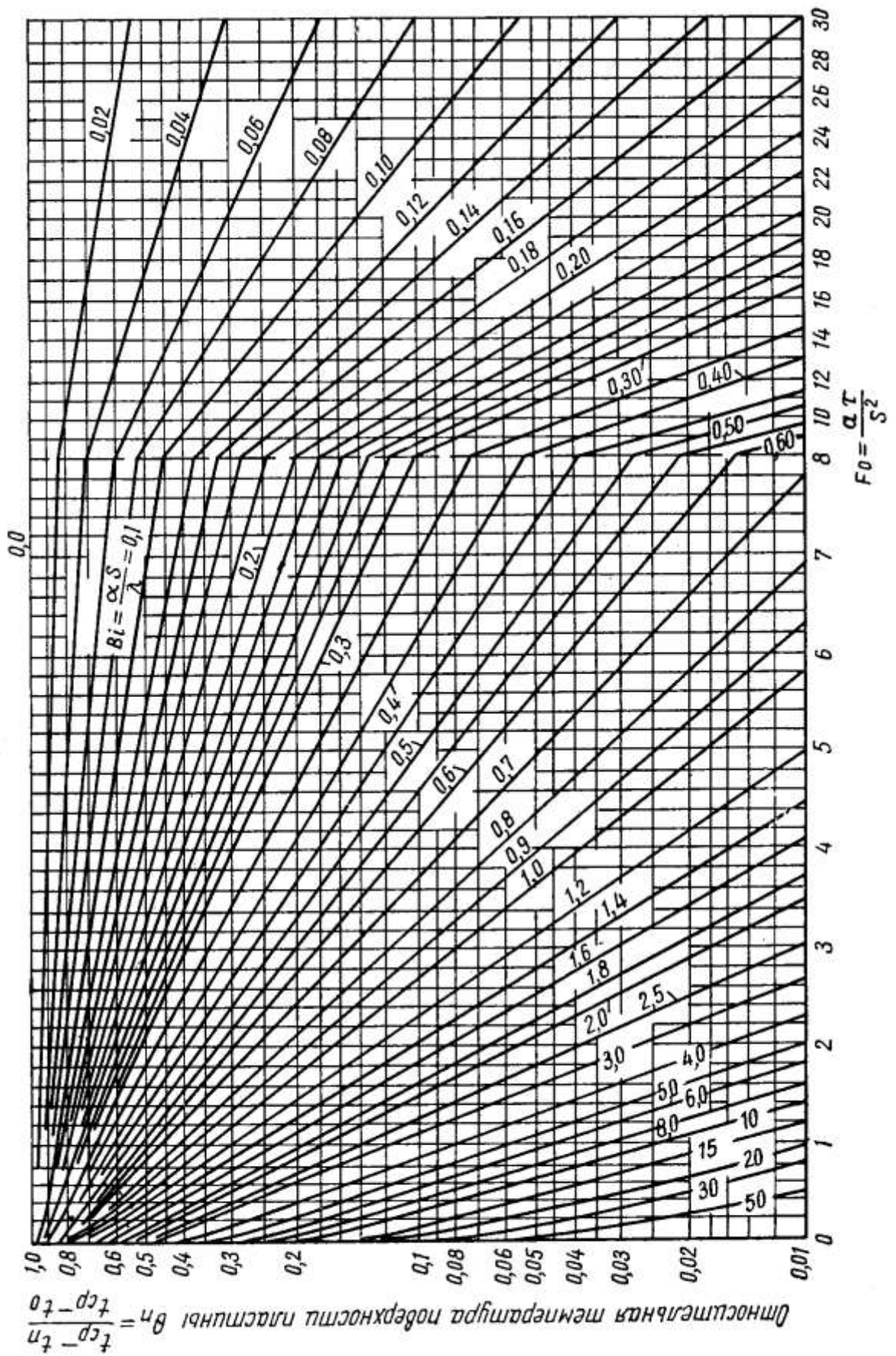
ПРИЛОЖЕНИЕ 14

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА ОСИ НЕОГРАНИЧЕННОГО ЦИЛИНДРА



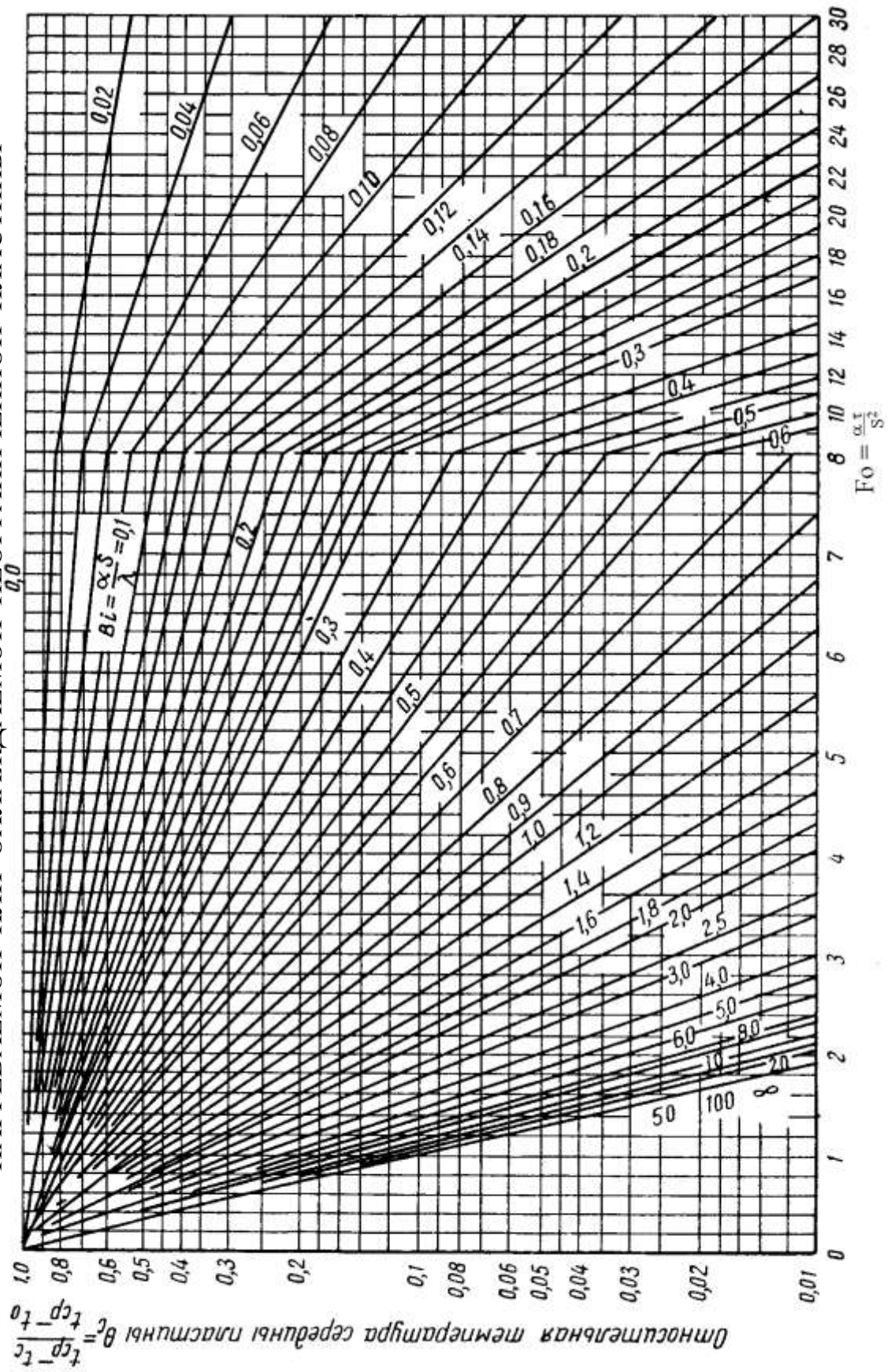
ПРИЛОЖЕНИЕ 15

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА ПОВЕРХНОСТИ НЕОГРАНИЧЕННОЙ ПЛАСТИНЫ



ПРИЛОЖЕНИЕ 16

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА СРЕДНЕЙ ПЛОСКОЙ СИММЕТРИЧНО
НАГРЕВАЕМОЙ ИЛИ ОХЛАЖДАЕМОЙ НЕОГРАНИЧЕННОЙ ПЛАСТИНЫ



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зайцев Ю. С. Промышленные печи : учеб. пособ. / Ю. С. Зайцев, О. В. Филиппев; под ред. О. В. Филиппева. – Харьков : ИСМО, 1998. – 547 с.
2. Свинолобов Н. П. Печи черной металлургии : учебн. пособ. для вузов / Н. П. Свинолобов, В. Я. Боровкин. – Днепропетровск : Пороги, 2004. – 154 с.
3. Губинский В. И. Металлургические печи: учеб. пособ. / В. И. Губинский. – Днепропетровск: НметАУ, 2006. – 85 с.
4. Ткаченко С. Й. Високотемпературні процеси та установки. Теорія, практика, самостійна та індивідуальна робота студентів/С. Й. Ткаченко, М. М. Чепурний, Л. А. Боднар. – Вінниця:ВНТУ, 2015. – 111 с.
5. Филимонов Ю. П. Топливо и печи : учеб. пособ. / Ю.П. Филимонов, Н.С. Громова. – Москва : Металлургия , 1987. – 320 с.
6. Високотемпературные теплотехнологические процессы и установки : учебник для вузов / под. ред. А. Д. Ключникова. – Москва: Энергоатомиздат, 1989 . – 336 с.
7. Сабірзянов Т. Г. Печі ливарних цехів / навч. посіб. / Т. Г. Сабірзянов. – Кіровоград: КНТУ, 2007. – 280 с.
8. Тепло- и массообменные аппараты и установки промышленных предприятий/под ред. проф. Б.А. Левченко. Часть 1,2. – Харьков: ХГПУ, 2000. – 334 с.

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
для курсового та дипломного проектування
«Розрахунок методичної печі»

для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика»
усіх форм навчання

Укладачі: ТАРАСЕНКО Микола Олексійович
ТАРАСЕНКО Олександр Миколайович

Відповідальний за випуск	проф. Ганжа А. М.
Роботу до видання рекомендував	Тютюник Л. І.

Редактор О.С. Самініна

План 2017 р., поз. 49

Підп. до друку 12.10.2017 Формат 60×84 1/16. Папір офсетн. Друк – ризографія.
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 1,7. Обл. – вид. арк. 2,2. Тираж 50 прим.
Зам. _____ Ціна договірна

Видавничий центр НТУ «ХПІ», 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК №116 від 10.07.2000 р

Самостійне електронне видання